

Pengembangan Sistem Visualisasi 3D Berbasis Web Menggunakan Data LiDAR dari iPhone 17 Pro

Yustina Cheline J. Owa¹, Septa Erik Prabawa², Ketut Tomy Suhari³

¹Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Dr. Soetomo ²Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Dr. Soetomo ³Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang

¹chelineyustina@gmail.com*, ²septa.erik.prabawa@unitomo.ac.id, ³ksuhari@lecturer.itn.ac.id

Abstract

This study develops a web-based 3D visualization system for a public wall mural captured using the LiDAR sensor of the iPhone 17 Pro. The workflow includes data acquisition, point cloud and mesh generation, conversion to glTF, packaging into 3D Tiles, semantic metadata integration, and interactive web visualization. The dataset contains 6,079,580 XYZRGB points with a local spatial extent of approximately 40.24 m × 5.93 m × 35.61 m. The reconstructed glTF model consists of 801,949 vertices and about 1,372,979 triangles, while the final 3D Tiles package uses implicit octree tiling with 89 GLB tiles across five levels. Results show that the conversion pipeline significantly improves web readiness, reducing data size by about 93.33% from raw XYZRGB to the final 3D Tiles package. External JSON-based metadata also supports dataset description and semantic grouping within the viewer. The novelty of this study lies in the end-to-end integration of low-cost mobile LiDAR acquisition, web-oriented geometric optimization, implicit tiling, and semantic 3D publication for documenting public art. These findings demonstrate that smartphone-based LiDAR can provide a practical and low-cost solution for 3D digitization and web publication of mural objects.

Keywords: web-based 3D visualization, smartphone LiDAR, iPhone 17 Pro, 3D model, mobile sensing

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan sistem visualisasi 3D berbasis web untuk objek mural dinding ruang publik yang direkam menggunakan sensor LiDAR pada iPhone 17 Pro. Alur penelitian mencakup akuisisi data, pembentukan *point cloud* dan *mesh*, konversi ke glTF, pengemasan ke 3D Tiles, integrasi metadata semantik, dan visualisasi interaktif berbasis website. Dataset yang diperoleh berisi 6.079.580 titik XYZRGB dengan cakupan spasial lokal sekitar 40,24 m × 5,93 m × 35,61 m. Model glTF hasil rekonstruksi memiliki 801.949 verteks dan sekitar 1.372.979 segitiga, sedangkan paket 3D Tiles menggunakan implicit octree tiling dengan 89 tile GLB pada lima level. Hasil menunjukkan bahwa pipeline konversi meningkatkan kesiapan distribusi data melalui web, dengan reduksi ukuran paket hingga sekitar 93,33% dari data XYZRGB mentah ke paket 3D Tiles akhir. Metadata eksternal berbasis JSON juga berhasil mendukung deskripsi dataset dan pengelompokan semantik objek pada viewer. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi *end-to-end* antara akuisisi mobile LiDAR berbiaya rendah, optimasi geometri berorientasi web, implicit tiling, dan publikasi 3D bersemantik untuk dokumentasi seni publik. Temuan ini menunjukkan bahwa LiDAR berbasis smartphone dapat menjadi solusi praktis dan low-cost untuk digitalisasi 3D serta publikasi web objek mural.

Kata kunci: visualisasi 3D berbasis web, smartphone LiDAR, iPhone 17 Pro, 3D Model, metadata semantik.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi akuisisi data tiga dimensi dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan pergeseran yang signifikan dari penggunaan instrumen survei khusus menuju perangkat bergerak yang lebih mudah diakses, fleksibel, dan praktis untuk digunakan di lapangan. Salah satu inovasi penting dalam perkembangan tersebut adalah hadirnya sensor LiDAR

pada lini iPhone Pro. Kehadiran teknologi ini menempatkan smartphone tidak lagi semata-mata sebagai perangkat dokumentasi visual, tetapi juga sebagai sarana akuisisi data spasial tiga dimensi yang memiliki potensi aplikatif pada berbagai bidang. Evolusi iPhone Pro dari generasi 12 Pro hingga 17 Pro menunjukkan perkembangan platform mobile yang semakin relevan untuk mendukung kebutuhan

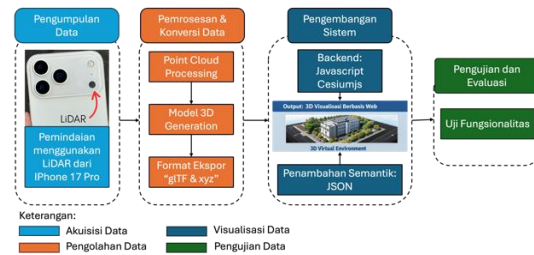
pemodelan spasial secara cepat, efisien, dan lebih ekonomis. Dalam penelitian ini, iPhone 17 Pro digunakan sebagai perangkat utama untuk akuisisi data objek mural ruang publik.

Dalam konteks dokumentasi digital, LiDAR berbasis smartphone menjadi perhatian karena menawarkan proses akuisisi yang relatif cepat, fleksibel, dan berbiaya lebih rendah dibandingkan pendekatan konvensional. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa teknologi smartphone LiDAR memiliki potensi yang baik untuk dokumentasi objek arsitektural, ruang interior, serta objek heritage pada skala kecil hingga menengah [1]–[5]. Namun demikian, sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada tahap akuisisi data, rekonstruksi geometri, atau evaluasi kualitas model. Integrasi menyeluruh dari hasil pemindaian menuju sistem visualisasi tiga dimensi berbasis web masih belum banyak dibahas secara komprehensif [6]–[10]. Di sisi lain, visualisasi 3D berbasis web memiliki peran yang semakin penting karena memungkinkan model digital diakses langsung melalui browser tanpa memerlukan perangkat lunak desktop khusus. Pendekatan ini sangat relevan untuk dokumentasi mural ruang publik yang bersifat temporer, mudah berubah, dan rentan hilang akibat renovasi, pengaruh cuaca, maupun perubahan fungsi ruang. Digitalisasi mural dalam bentuk model 3D berbasis web tidak hanya mendukung fungsi visualisasi, tetapi juga berperan sebagai sarana dokumentasi spasial untuk edukasi, promosi, arsip digital, dan interpretasi objek secara interaktif [11]–[14].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem visualisasi 3D berbasis website menggunakan data LiDAR dari iPhone 17 Pro, serta mengevaluasi bagaimana hasil pemindaian dapat diolah menjadi model yang ringan, terstruktur secara semantik, dan interaktif. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi *end-to-end* antara akuisisi smartphone LiDAR, optimasi model 3D, konversi glTF, pengemasan 3D Tiles, integrasi metadata eksternal, dan implementasi visualisasi web interaktif untuk dokumentasi mural ruang publik.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun sistem yang terdiri atas enam tahapan utama, yaitu: (1) akuisisi data LiDAR, (2) pembentukan dan pembersihan model 3D, (3) konversi ke format web, (4) perancangan metadata semantik, (5) implementasi visualisasi berbasis website, dan (6) pengujian sistem. Alur umum penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Alur penelitian pengembangan sistem visualisasi 3D

2.1. Perangkat Penelitian

Perangkat keras dan lunak yang digunakan dalam penelitian diringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Perangkat Keras dan Perangkat Lunak Penelitian

No	Komponen	Spesifikasi/Fungsi
1	Smartphone	Iphone 17 Pro untuk akuisisi data LiDAR
2	Aplikasi scan 3D	Aplikasi 3DScanner untuk pemindaian LiDAR untuk menghasilkan <i>point cloud</i> dan <i>mesh</i>
3	Laptop	Digunakan untuk pengolahan model, konversi format, dan pengembangan sistem
4	Github	Digunakan untuk penyimpanan skrip, pembuatan domain (github.io), dan free hosting.
5	Web Framework	Digunakan untuk pengelolaan backend dan proses unggah file
6	Library visualisasi	WebGL, Threejs, Cesiumjs
7	Basis data	Digunakan untuk penyimpanan metadata model dan informasi objek

2.2. Akuisisi Data LiDAR

Akuisisi dilakukan menggunakan iPhone 17 Pro pada objek mural dinding ruang publik. Proses scanning dilakukan dengan mengarahkan perangkat secara bertahap hingga seluruh bagian utama objek dapat terekam. Hasil pemindaian menghasilkan representasi spasial berupa *point cloud* atau *mesh* rekonstruksi. Proses akuisisi data mural menggunakan iPhone 17 Pro ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses akuisisi data mural menggunakan iPhone 17 Pro

Setiap titik hasil pemindaian dinyatakan sebagai Persamaan (1):

$$P_i = (x_i, y_i, z_i, r_i, g_i, b_i) \quad (1)$$

Dengan P_i adalah titik ke- i , x_i , y_i , dan z_i adalah koordinat spasial tiga dimensi, sedangkan r_i , g_i , dan b_i adalah komponen warna hasil integrasi sensor LiDAR dan kamera RGB. Representasi ini digunakan karena penelitian tidak hanya membutuhkan geometri, tetapi juga visual appearance mural [1], [3], [5].

2.2. Pembentukan dan Konversi Model 3D

Data mentah diperiksa untuk mengurangi noise dan bagian yang tidak relevan. Apabila keluaran awal berupa *point cloud*, data direkonstruksi menjadi *mesh*; jika sudah berupa *mesh*, dilakukan optimasi geometri agar lebih ringan untuk visualisasi web.

Kompleksitas model dinyatakan sebagai Persamaan (2):

$$C(M) = (|V|, |F|) \quad (2)$$

dengan $|V|$ menyatakan jumlah verteks dan $|F|$ jumlah *face* atau *triangle*.

Untuk menjaga performa visualisasi, rasio kompresi atau penyederhanaan model dihitung dengan

$$R_c = 1 - \frac{C_1}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

dengan R_c adalah persentase reduksi kompleksitas model, dengan C_0 adalah kompleksitas awal dan C_1 kompleksitas setelah optimasi.

Model kemudian dikonversi ke glTF/GLB untuk menjamin kompatibilitas web [7], [9], [10], [15].

2.3. Perancangan Data Semantik

Selain geometri, sistem juga dirancang agar mampu menampilkan atribut tambahan dari setiap model. Informasi ini disimpan dalam bentuk tabel semantik yang kemudian dipetakan ke struktur JSON. Format ini dipilih karena mudah dibaca oleh aplikasi web dan mendukung integrasi dengan model 3D.

Struktur data semantik yang digunakan dapat dinyatakan sebagai

$$S_j = \{id, atribut\} \quad (4)$$

dengan S_j adalah data semantik objek ke- i , id adalah identitas unik objek, dan *atribut* adalah sekumpulan informasi objek yang disimpan dalam sistem, seperti nama, kategori, deskripsi, file model 3D, koordinat, dan metadata pendukung. Rincian atribut yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Format Data Semantik Model 3D

No	Atribut	Deskripsi
1	id_model	Identitas unik untuk setiap model 3D
2	nama_objek	Nama objek, bangunan, atau ruang
3	kategori	Klasifikasi atau jenis objek
4	file_model	Nama file model 3D berformat GLB atau GLTF
5	thumbnail	File gambar pratinjau objek
6	deskripsi	Uraian singkat mengenai objek
7	latitude	Nilai koordinat lintang
8	longitude	Nilai koordinat bujur
9	tinggi	Nilai elevasi atau tinggi objek
10	atribut_tambahan	Informasi tambahan dalam format teks atau JSON

Data CSV tersebut kemudian diubah ke JSON agar dapat dipanggil oleh sistem web secara dinamis. Struktur sederhananya adalah sebagai berikut

File JSON

```
[
  {
    "id_model": "M001",
    "nama_objek": "Ruang Studio",
    "kategori": "Interior",
    "file_model": "ruang_studio.glb",
    "thumbnail": "ruang_studio.jpg",
    "deskripsi": "Model 3D hasil pemindaian LiDAR iPhone 17 Pro",
    "latitude": -7.9666,
    "longitude": 112.6326,
    "tinggi": 0.0,
    "atribut_tambahan": {
      "sensor": "LiDAR",
      "perangkat": "iPhone 17 Pro"
    }
  }
]
```

2.4. Implementasi Website

Pada tahap implementasi, fungsi utama sistem website meliputi: (1) unggah model 3D, (2) unggah data semantik, (3) validasi file, (4) visualisasi model, (5) interaksi pengguna terhadap objek, dan (6) penampilan metadata.

Alur algoritma sistem dapat dituliskan sebagai berikut.

Program Visualisasi Model 3D

Input : *fileModel, fileSemantik*

Output : *model 3D tampil pada browser*

Initialization:

validModel $\leftarrow$ false

validData $\leftarrow$ false

Read *fileModel*

If *extension(fileModel)* = ".glb" or ".gltf" then
validModel $\leftarrow$ true

End If

Read *fileSemantik*

If *extension(fileSemantik)* = ".json" or ".csv" then
validData $\leftarrow$ true

End If

If *validModel* = true and *validData* = true then

upload fileModel to server

convert fileSemantik if needed

load model into 3D viewer

bind semantic data to object

display object attributes on interaction

Else

show validation error

End If

Sistem dibangun dengan arsitektur client-server. Pada sisi server, sistem menangani file model, metadata, dan struktur tileset. Pada sisi klien, browser memanggil model 3D dan file JSON semantik untuk divisualisasikan secara interaktif. Waktu pemuatan model dapat dipandang sebagai Persamaan (5):

$$T_l = T_d + T_p + T_r \quad (5)$$

dengan T_l adalah total waktu muat model, T_d adalah waktu pengambilan data dari server, T_p adalah waktu parsing file model, dan T_r adalah waktu rendering awal di browser. Persamaan ini digunakan untuk mengevaluasi kelayakan sistem dalam menampilkan model 3D secara responsif.

2.5. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu bekerja sesuai tujuan penelitian. Pengujian dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengujian fungsional dan pengujian performa.

Pengujian fungsional mencakup: (1) keberhasilan unggah model, (2) keberhasilan unggah data semantik, (3) keberhasilan pemanggilan model pada browser, (4) keberhasilan interaksi rotasi, zoom, dan pan, serta (5) keberhasilan penampilan informasi objek.

Pengujian performa mencakup: (1) ukuran file model setelah optimasi, (2) waktu muat model pada browser, (3) kelancaran interaksi visualisasi, dan (4) stabilitas sistem saat menangani lebih dari satu model.

Tingkat keberhasilan fungsional dinyatakan sebagai Persamaan (6):

$$A_s = \frac{N_b}{N_t} \times 100\% \quad (6)$$

dengan A_s adalah persentase keberhasilan sistem, N_b adalah jumlah pengujian yang berhasil, dan N_t adalah jumlah seluruh skenario pengujian. Nilai ini digunakan untuk memberikan gambaran kuantitatif terhadap keandalan sistem yang dibangun.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Akuisisi Data LiDAR

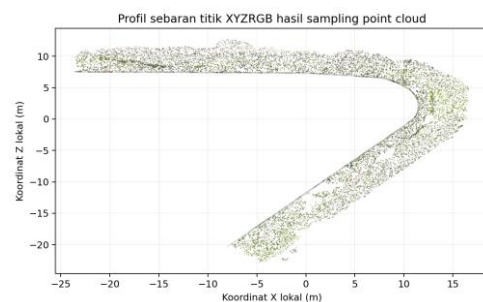
Hasil akuisisi menunjukkan bahwa objek mural berhasil direpresentasikan dalam bentuk 3D dengan struktur permukaan yang baik pada bagian utama objek. Hasil *point cloud* dan *trajectory* kamera selama pemindaian ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Trajectory* kamera selama pemindaian mural

Dataset *point cloud* berisi 6.079.580 titik XYZRGB. Cakupan spasial lokal yang terbaca dari data adalah sekitar 40,24 m $\times$ 5,93 m $\times$ 35,61 m, sehingga hasil scan tidak hanya merekam bidang mural, tetapi juga elemen konteks di sekitarnya. Nilai ini menunjukkan bahwa akuisisi smartphone LiDAR mampu menangkap objek secara cukup informatif untuk keperluan dokumentasi digital.

Untuk memperjelas distribusi data, profil sebaran titik XYZRGB pada bidang vertikal dapat ditampilkan. Visualisasi ini berguna untuk membaca ketebalan sebaran titik dan perilaku permukaan hasil pemindaian. Profil sebaran titik XYZRGB pada bidang X-Z ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil sebaran titik XYZRGB pada bidang X-Z

Agar data numerik utama lebih ringkas, metrik hasil akuisisi ditempatkan dalam tabel. Ringkasan metrik utama hasil akuisisi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan metrik utama hasil akuisisi data LiDAR

Parameter	Nilai
-----------	-------

Jumlah titik XYZRGB	6,079,580 titik
Minimum koordinat lokal	(-23.6196, -0.2439, -22.8346)
Maksimum koordinat lokal	(16.6196, 5.6899, 12.7710)
Dimensi bounding box	40.2392 m × 5.9338 m × 35.6056 m
Koordinat georeferensi aproksimatif	Lat -7.959268, Lon 112.591185, h 560.635 m

3.2 Hasil Rekonstruksi glTF

Model glTF hasil rekonstruksi terdiri atas 1 *scene*, 1 *node*, 1 *mesh*, 1 *material*, dan 1 *tekstur*. Hasil analisis menunjukkan bahwa model memiliki 801.949 verteks dan 4.118.937 indeks, yang ekuivalen dengan sekitar 1.372.979 segitiga. Hal ini menunjukkan bahwa *point cloud* hasil LiDAR telah berhasil direkonstruksi menjadi *mesh* bertekstur yang cukup rinci untuk kebutuhan visualisasi mural.

Pada tahap ini, penggunaan glTF penting karena format tersebut dirancang sebagai format transmisi model 3D yang efisien untuk aplikasi web [7], [10], [15].

3.3. Hasil Konversi ke 3D Tiles dan Efisiensi Data

Dataset selanjutnya dikonversi menjadi 3D Tiles 1.1 dengan implicit octree tiling. Paket akhir terdiri atas satu *tileset.json*, satu *subtree*, dan 89 *tile GLB* pada lima level hierarki. Hasil ini menunjukkan bahwa model telah siap untuk streaming bertingkat pada browser, sejalan dengan karakteristik 3D Tiles yang memang dirancang untuk streaming dan rendering konten geospasial 3D secara hierarkis. Hasil konversi model ke 3D Tiles dan manual georeference ditunjukkan pada Gambar 5.

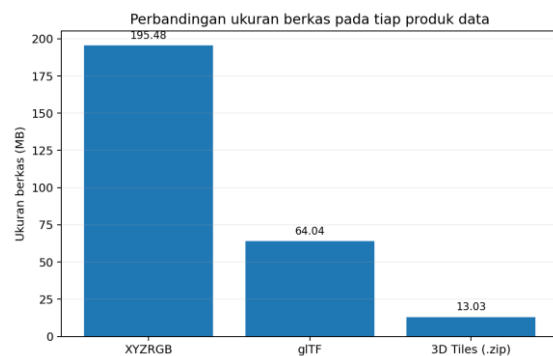


Gambar 5. Konversi ke 3D Tiles dan proses manual georeference

3.4 Analisis Efisiensi Data

Hasil analisis ukuran berkas menunjukkan bahwa data XYZRGB mentah berukuran 195,48 MB, model glTF berukuran 64,04 MB, dan paket 3D Tiles akhir berukuran 13,03 MB. Dari data tersebut diperoleh reduksi ukuran sebesar 67,24% dari XYZRGB ke glTF, 79,65% dari glTF ke 3D Tiles, dan 93,33% dari XYZRGB ke 3D Tiles. Temuan ini memperlihatkan bahwa pipeline yang dibangun tidak hanya mengubah

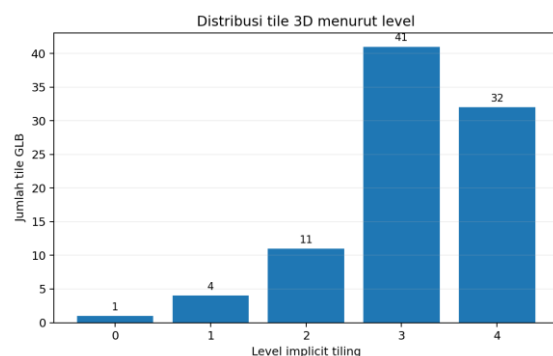
format data, tetapi juga meningkatkan kelayakan distribusi melalui web. Perbandingan ukuran berkas pada setiap tahap produk data ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan ukuran berkas XYZRGB, glTF, dan 3D Tiles

3.4. Distribusi Tile dan Analisis Kesiapan Streaming

Distribusi tile per level menunjukkan bahwa level 0 memuat 1 tile, level 1 memuat 4 tile, level 2 memuat 11 tile, level 3 memuat 41 tile, dan level 4 memuat 32 tile. Dominasi tile pada level 3 dan 4 menunjukkan bahwa detail spasial utama disimpan pada level yang lebih dalam, sementara level atas tetap ringan untuk pemanggilan awal. Temuan ini konsisten dengan prinsip streaming progresif pada 3D Tiles dan Web-GIS 3D [6]–[10]. Distribusi tile GLB menurut level implicit tiling ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Distribusi tile GLB pada setiap level implicit tiling

Distribusi numerik *tile per level* dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 4. Distribusi tile GLB menurut level hierarki

Level	Jumlah tile	Proporsi (%)	Ukuran GLB (MB)
0	1	1.12	0.08
1	4	4.49	0.42
2	11	12.36	1.74
3	41	46.07	7.55
4	32	35.96	3.34

3.5. Metadata Eksternal dan Analisis Implementasi Web

Metadata eksternal berbasis JSON digunakan untuk menyimpan identitas dataset, perangkat akuisisi, koordinat aproksimatif, deskripsi objek, dan atribut tambahan. Pendekatan ini membuat viewer tidak berhenti sebagai penampil *mesh*, tetapi juga menjadi media informasi yang menghubungkan objek 3D dengan data deskriptif. Tampilan model 3D pada viewer berbasis web ditunjukkan pada Gambar 8.



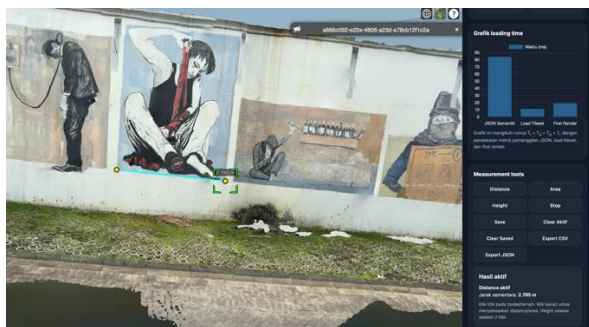
Gambar 8. Tampilan model 3D pada viewer berbasis web

Integrasi model 3D dengan metadata semantik pada website ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Integrasi model 3D dengan metadata semantik pada website

Pemanfaatan measurement tools dalam website ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pemanfaatan menu measurement tools pada website

Analisis web dilakukan dengan menghubungkan hasil kuantitatif dataset dengan komponen viewer. Reduksi ukuran data pada Persamaan (4) menjelaskan kesiapan

file untuk dikirim ke browser. Distribusi tile pada Persamaan (5) menjelaskan kesiapan streaming bertingkat. Sementara itu, verifikasi implementasi menggunakan Persamaan (6) dilakukan terhadap sembilan fungsi inti, yaitu pemanggilan 3D Tiles lokal, pemanggilan metadata JSON, panel metadata dataset, layer OSM Buildings, fokus kamera ke objek, tools distance, tools area, tools height, dan ekspor CSV/JSON.

Tabel 5. Verifikasi fungsi inti pada prototype web

Fungsi	Status	Keterangan
3D Tiles lokal	Berhasil	Tileset dipanggil melalui path lokal
Metadata JSON	Berhasil	Metadata eksternal dibaca dan ditampilkan
Panel metadata	Berhasil	Informasi dataset tampil pada panel viewer
OSM Buildings	Berhasil	Layer tambahan dapat diaktifkan/nonaktifkan
Fokus kamera	Berhasil	Viewer dapat mengarahkan kamera ke bounding sphere
Distance measure	Berhasil	Pengukuran jarak tersedia
Area measure	Berhasil	Pengukuran luas tersedia
Height measure	Berhasil	Pengukuran tinggi tersedia
Ekspor CSV/JSON	Berhasil	Hasil pengukuran dapat diunduh

Berdasarkan pemeriksaan implementasi viewer, seluruh fungsi inti telah tersedia pada prototype, sehingga $A_s = 9/9 \times 100\% = 100\%$. Nilai ini tidak dimaksudkan sebagai benchmark performa waktu nyata, tetapi sebagai verifikasi bahwa metode yang dirancang benar-benar terhubung dengan fungsi analisis dan interaksi web.

3.6. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap tahapan metode terhubung langsung dengan hasil implementasi. Persamaan (1) menjelaskan bahwa data .xyz memuat koordinat dan warna. Persamaan (2) menjelaskan kompleksitas *mesh* glTF. Persamaan (3) menjelaskan efisiensi reduksi ukuran berkas. Persamaan (4) menjelaskan struktur metadata semantik. Persamaan (5) mendasari analisis kesiapan pemuatan model pada web, dan Persamaan (6) menghubungkan rancangan pengujian dengan verifikasi fungsi inti viewer.

Dari perspektif dokumentasi digital, mural dinding ruang publik merupakan studi kasus yang tepat karena memiliki bentuk bidang yang jelas, tekstur visual kuat, serta nilai arsip yang tinggi. Dari perspektif web, temuan paling penting adalah keberhasilan mengubah data mentah yang besar menjadi representasi 3D Tiles yang jauh lebih ringan dan siap di-stream secara progresif. Ini menunjukkan bahwa smartphone LiDAR tidak hanya relevan untuk akuisisi cepat, tetapi juga untuk sistem publikasi 3D berbasis web [6]–[11]. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan,

yaitu ketelitian geometrik belum divalidasi terhadap kontrol lapangan, dan metadata masih berada pada level eksternal, belum sampai pada segmentasi feature-level di dalam 3D Tiles.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem visualisasi 3D berbasis web menggunakan data LiDAR dari iPhone 17 Pro pada objek mural dinding ruang publik. Dataset yang dihasilkan terdiri atas *point cloud* XYZRGB sebanyak 6.079.580 titik, model glTF dengan 801.949 verteks dan sekitar 1.372.979 segitiga, serta paket 3D Tiles implicit octree dengan 89 tile GLB pada lima level. Dimensi bounding box lokal yang diperoleh adalah 40,24 m × 5,93 m × 35,61 m.

Hasil menunjukkan bahwa tahapan metode terhubung langsung dengan hasil implementasi. Akuisisi menghasilkan data geometri dan warna, rekonstruksi menghasilkan *mesh* bertekstur, optimasi dan konversi menurunkan ukuran berkas secara signifikan, sedangkan implicit tiling membuat dataset siap untuk streaming web. Dari data mentah XYZRGB ke paket 3D Tiles, reduksi ukuran mencapai sekitar 93,33%, yang menegaskan kesiapan distribusi melalui browser. Selain itu, prototipe viewer berhasil menjalankan seluruh fungsi inti visualisasi, metadata, pengukuran, dan ekspor dengan tingkat keberhasilan fungsional 100%.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa *smartphone* LiDAR dapat dimanfaatkan sebagai solusi *low-cost* untuk digitalisasi objek seni publik dan penyajiannya melalui website. Kontribusi utama penelitian terletak pada integrasi antara akuisisi mobile LiDAR, efisiensi data berbasis glTF dan 3D Tiles, metadata semantik eksternal, serta visualisasi web interaktif. Pengembangan selanjutnya disarankan untuk menambahkan uji akurasi geometrik terhadap data kontrol lapangan, benchmark performa browser menggunakan Navigation Timing dan Web Vitals, serta integrasi metadata internal pada level fitur 3D Tiles.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Amerta Geospasial Indonesia atas dukungan peralatan LiDAR yang digunakan dalam penelitian ini.

Daftar Rujukan

- [1] Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M. and Pierdicca, R., 2021. Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), pp.2387–2429.
- [2] Costantino, D., Voza, G., Pepe, M. and Alfio, V.S., 2022. Smartphone LiDAR technologies for surveying and reality modelling in urban scenarios: evaluation methods, performance and challenges. *Applied System Innovation*, 5(4), 63.
- [3] Catharia, O., Richard, F., Vignoles, H., Véron, P., Aoussat, A. and Segonds, F., 2023. Smartphone LiDAR data: a case study for numerisation of indoor buildings in railway stations. *Sensors*, 23(4), 1967.
- [4] Askar, C. and Sternberg, H., 2023. Use of smartphone LiDAR technology for low-cost 3D building documentation with iPhone 13 Pro: a comparative analysis of mobile scanning applications. *Geomatics*, 3(4), pp.563–579.
- [5] Cuperschmid, A.R.M., de Oliveira, N., de Carvalho, M.A.G., Gonçalves, M.L.A. and Amorim, A., 2024. Exploring the use of LiDAR in smartphones: documenting the frontispiece of Saint Francis of Assisi Church in Ouro Preto, Brazil. *International Journal of Architectural Heritage*.
- [6] Kulawiak, M., Kulawiak, M. and Lubniewski, Z., 2019. Integration, processing and dissemination of LiDAR data in a 3D Web-GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 144.
- [7] Buyukdemircioglu, M. and Kocaman, S., 2020. Reconstruction and efficient visualization of heterogeneous 3D city models. *Remote Sensing*, 12(13), 2128.
- [8] Zhan, W., Chen, Y. and Chen, J., 2021. 3D Tiles-based high-efficiency visualization method for complex BIM models on the Web. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 476.
- [9] Schilling, A., Bolling, J. and Nagel, C., 2016. Using glTF for streaming CityGML 3D city models. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Web3D Technology*. Anaheim, California, USA, 22–24 July 2016. ACM: New York, pp.109–116.
- [10] Yang, Z., Li, J., Hyppä, J., Gong, J., Liu, J. and Yang, B., 2023. A comprehensive and up-to-date web-based interactive 3D emergency response and visualization system using Cesium Digital Earth: taking landslide disaster as an example. *Big Earth Data*, 7(4), pp.1058–1080.
- [11] Jo, Y.H. and Hong, S., 2019. Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 53.
- [12] Auer, M. and Zipf, A., 2018. 3D WebGIS: From visualization to analysis. An efficient browser-based 3D line-of-sight analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 279.
- [13] Dewi NI, Putra WB. Pemindaian Ruang pada Bangunan dengan Mobile LiDAR Camera. *Jurnal Arsitektur TERRACOTTA*. 2023;4(1).
- [14] La Guardia, M. and Koeva, M., 2023. Towards digital twinning on the web: heterogeneous 3D data fusion based on open-source structure. *Remote Sensing*, 15(3), 721.
- [15] Khronos Group, 2021. glTF 2.0 Specification. [Online] Available at: <https://registry.khronos.org/glTF/specs/2.0/glTF-2.0.html> [Accessed 14 March 2026].
- [16] Open Geospatial Consortium, 2023. 3D Tiles Specification 1.1. [Online] Available at: <https://www.ogc.org/standards/3DTiles/> [Accessed 14 March 2026].
- [17] Apple, 2026. iPhone – Compare Models. [Online] Available at: <https://www.apple.com/id/iphone/compare/> [Accessed 14 March 2026]. Informasi ini relevan untuk konteks lintas generasi model iPhone Pro.
- [18] World Wide Web Consortium, 2025. Navigation Timing Level 2. [Online] Available at: <https://www.w3.org/TR/navigation-timing-2/> [Accessed 14 March 2026]. Catatan: status dokumen saat ini adalah Working Draft, bukan Recommendation.
- [19] Walton, P., 2024. Web Vitals. [Online] Available at: <https://web.dev/articles/vitals> [Accessed 14 March 2026].
- [20] Apple, 2026. iPhone 17 Pro and iPhone 17 Pro Max – Technical Specifications. [Online] Available at: <https://www.apple.com/iphone-17-pro/specs/> [Accessed 14 March 2026].

